5Г

УДК 004.94

К.В. Гамаль, О.И. Пылыпчак
Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов, Украина
kh.hamal@gmail.com

Разработка подхода к моделированию пространственного распределения эмиссий парниковых газов на примере их инвентаризации в жилищном секторе Закарпатской области Украины

В статье рассматривается проблема построения подхода к моделированию пространственно распределенных эмиссий парниковых газов от передвижных и стационарных источников эмиссий в жилищном секторе. Предложен метод пространственной инвентаризации парниковых газов, базирующийся на использовании линейных и плоскостных источников эмиссии и геоинформационных систем, что дает возможность учитывать специфику эмиссионных процессов на уровне элементарных объектов заданного размера.

Введение

Климатические изменения происходят через усиление так называемого «парникового эффекта» в результате накопления в атмосфере парниковых газов (ПГ) – углекислого газа CO_2, метана CH_4, закиси азота N_2O и других, что связано с хозяйственной деятельностью человека (сжиганием ископаемого топлива, вырубкой лесов, развитием промышленности, деятельностью транспорта и тому подобное). Одним из самых влиятельных секторов антропогенной деятельности в плане эмиссий ПГ есть жилищный сектор, который включает эмиссии в результате сжигания топлива для отопления жилья и на деятельность дорожного транспорта в частной собственности.

На сегодня в Украине для жилищного сектора инвентаризация эмиссий ПГ проводится на уровне территории целого государства и отдельных областей и хотя такие показатели эмиссий являются важной информацией для мониторинга выполнения международных обязательств и прогнозирования антропогенной нагрузки на атмосферу.

Целью данной работы является разработка подхода к моделированию пространственно распределенных эмиссий ПГ от передвижных и стационарных источников эмиссий в жилищном секторе.

Методика пространственно распределенной инвентаризации ПГ

Результатом пространственного моделирования эмиссий ПГ являются наборы значений эмиссий за некоторый промежуток времени, которые дополнительно содержат также географическую привязку к определенной части исследуемой территории. Для климатических моделей и для анализа территориального распределения общих эмиссий важными являются результаты вычисления эмиссий на уровне элементарных участ-

ков одинаковой, достаточно малой, площади, которые образуются путем условного наложения сетки с клетками определенного размера на исследуемую территорию. Причем размер таких клеток зависит от цели проведения инвентаризации и размера исходной территории.

Эмиссия ПГ в пределах элементарного участка для определенного рода деятельности является суммой эмиссий от всех источников, которые частично или полностью расположены в ее пределах. Для каждого рода антропогенной деятельности удельные эмиссии ПГ являются определенной функцией от параметров, которые характеризуют интенсивность этой деятельности на некотором участке территории, соответствующих коэффициентов эмиссии, географических координат исследуемого участка и времени [1]:

$$e = \varphi\left(a_{x,y,i}, b_{x,y,i}, \ldots, x, y, t\right), \tag{1}$$

где a – данные о деятельности, b – параметры, которые влияют на уровень эмиссий, (x, y) – географические координаты объекта исследования, i – род деятельности, t – время.

Если удельные эмиссии являются функцией от координат, которые задают размещение объекта исследования, тогда результат традиционной инвентаризации выражается следующим образом:

$$E = \iint \varphi\left[a(x, y)_i, b(x, y)_i, \ldots, x, y, t\right] dxdy\,. \tag{2}$$

Используя формулу (2), можно вычислить эмиссии на уровне целой страны или отдельного ее региона.

Инвентаризация эмиссий в жилищном секторе

Жилищный сектор включает ряд подсекторов, которые, в свою очередь, можно разложить на отдельные классы источников эмиссий. В пределах отдельно взятого элементарного участка находятся разнородные источники эмиссий – большие и мелкие, по размерам эмиссий, передвижные и стационарные и тому подобное.

Для осуществления пространственного анализа целесообразно все источники эмиссий в жилищном секторе разделять на два основных типа – линейные и плоскостные. К линейным источникам выбросов ПГ в атмосферу отнесены источники, зафиксированные в пространственной системе координат в виде линии. К таким источникам дальше отнесены автомобильные пути. Пространственное моделирование эмиссий для линейных объектов осуществляется путем их разбивки на отрезки с помощью наложения сетки; и для каждого отрезка вычисляют значение эмиссий с учетом многочисленных параметров, которые определяют эти уровни эмиссий (например, категория дороги, которой принадлежит анализируемый отрезок; суточная или годовая загруженность участка дороги; отдаленность от населенных пунктов для автомобильных дорог и тому подобное).

К плоскостным источникам эмиссии ПГ относят источники, выбросы от которых происходят из поверхности, которая занимает определенную площадь. К плоскостным источникам эмиссии целесообразно также относить участки территории, на которых сконцентрировано большое количество небольших точечных или линейных источников эмиссий. Например, к таким источникам отнесена внутренняя транспортная сеть в больших городах (через высокую плотность дорог и улиц) и домохозяйства. Для таких источников эмиссий данные о хозяйственной деятельности доступны лишь в агрегированном виде на уровне целой области, отдельного административного района или города областного подчинения (ГОП).

Подход к пространственному моделированию эмиссий ПГ требует возможности оперировать административными единицами, отдельными источниками эмиссий и тому подобное как с географическими объектами с набором как собственных свойств, так и географических характеристик для каждого из них. Определим множества таких географических объектов: $\widetilde{O} = \{O_1, ..., O_n\}$ – множество административных областей; $\widetilde{N} = \{N_1, N_2, ...\}$ – множество городов областного подчинения; $\widetilde{R} = \{R_1, R_2, ...\}$ – множество районов; $\widetilde{S} = \{S_1, S_2, ...\} = \{\widetilde{S}^{Urb}, \widetilde{S}^{Rur}\}$ – множество населенных пунктов всех типов, $\widetilde{S}^{Urb} = \{S_1^{Urb}, S_2^{Urb}, ...\}$ – множество городов и поселков городского типа, $\widetilde{S}^{Rur} = \{S_1^{Rur}, S_2^{Rur}, ...\}$ – множество сел, $\widetilde{D} = \{D_1, D_2, ...\}$ – множество автомобильных дорог, $\widetilde{S}^Z \subset \widetilde{S}$ – множество населенных пунктов, для которых построены буферные зоны, $\Delta = \{\delta_1, \delta_2, ...\}$ – множество элементарных участков, на которые разбита территория. Для географических объектов дополнительно введен ряд отношений, которые используются не в теоретико-множественном понимании, а для определения территориальной принадлежности и взаимного размещения географических объектов. Для географических объектов определены следующие операции: 1) географической принадлежности ($\hat{\in}$); 2) географического пересечения ($\hat{\cap}$); 3) географического объединения ($\hat{\cup}$); 4) географической разницы или «вырезки» $(\hat{-})$.

Эмиссии ПГ от стационарных источников

Эмиссии ПГ от стационарных источников в жилищном секторе возникают в результате сжигания реализованных населению топливных продуктов: природного газа, каменного угля, дров для отопления, торфяных брикетов.

Коэффициенты эмиссий ПГ при сжигании топлива в жилищном секторе зависят от вида топлива и его химических характеристик, которые отличаются для разных регионов страны. Технология сжигания топлива в жилищном секторе не отличается для отдельных населенных пунктов, потому не влияет на пространственную дифференцированность коэффициентов эмиссии. Такие виды топлива как каменный уголь, дрова, торфяные брикеты используют в основном в сельской местности как основной или дополнительный источник энергии для отопления домов и других бытовых потребностей. Поэтому областные или районные объемы продажи этих видов топлива целесообразно распределять лишь в сельской местности, пропорционально к количеству сельского населения, что в них проживает. Зато природный газ и сжиженный газ используют для отопления как в сельских, так и городских поселениях, причем относительное количество газифицируемых квартир сжиженным газом в сельской местности в несколько раз преобладает такое количество в городских поселениях, а для природного газа – наоборот. На уровне элементарного участка эмиссии ПГ от сжигания топлива в жилищном секторе определяют с помощью математической модели:

$$E_{Res}^{G}(\delta) = \sum_{s \in \widetilde{S}^{Rur}} \left(\left[\sum_{i=1}^{I_1} \frac{M_{\mathrm{Re}s,i}^{O} \cdot \left(P_{Rur,i}^{R} + P_{Urb,i}^{R}\right)}{P_{Rur,i}^{O} + P_{Urb,i}^{O}} \cdot K_i^{Rur} \cdot EF_{\mathrm{Re}s,i}^{G} + \sum_{j=1}^{J_2} M_{\mathrm{Re}s,j}^{R} \cdot EF_{\mathrm{Re}s,j}^{G} \right] \times \right.$$
$$\left. \times \frac{Q(s) \cdot area(s \hat{\cap} \delta)}{area(s) \cdot \sum_{p \in \{\widetilde{S}^{Rur} \hat{\cap} R\}} Q(p)} \right) + \sum_{s \in \widetilde{S}^{\mathrm{Urb}}} \left(\sum_{i=1}^{I_1} \frac{M_{\mathrm{Re}s,i}^{O} \cdot \left(P_{Rur,i}^{R} + P_{Urb,i}^{R}\right)}{P_{Rur,i}^{O} + P_{Urb,i}^{O}} \cdot K_i^{Urb} \times \right. \qquad (3)$$
$$\left. \times EF_{\mathrm{Re}s,i}^{G} \frac{Q(s) \cdot area(s \hat{\cap} \delta)}{area(s) \cdot \sum_{p \in \{\widetilde{S}^{Urb} \hat{\cap} R\}} Q(p)} \right), \; R = \{R \in \widetilde{R} \wedge \delta \hat{\in} R\},$$

где i определяет такие виды топлива: природный и сжиженный газ ($I_1 = 2$), j определяет виды топлива, которые используют для отопления лишь в сельской местности: каменный уголь, дрова, торфяные брикеты ($J_2 = 3$); R – административный район, которому принадлежит элементарный участок δ; K_i^{Rur} и K_i^{Rur} – показатели, которые используют для выделения части из общерайонных объемов потребления топлива, сожженного в сельской и городской местностях соответственно; $P_{Rur,i}$ и $P_{Urb,i}$ – количество газифицируемых квартир i-м видом топлива в разрезе сел и городов соответствующего района; $M_{\mathrm{Res},i}$ с соответствующим верхним индексом – среднегодовые расходы топлива на одно помещение в сельской и городской местностях; $EF_{\mathrm{Res},i}^{G}$ – коэффициент эмиссии; индекс *Res* используется для отображения того, что соответствующий показатель относится к жилищному сектору.

Эмиссии ПГ от передвижных источников

К этой категории относят эмиссии в результате сжигания моторного бензина и дизельного топлива, реализованного населению через автозаправочные станции и использованные на деятельность частных транспортных средств населения.

Эмиссии CO_2 вычисляют на основе данных об объеме сожженного топлива и содержимом углерода в конкретном типе топлива. Зато эмиссии таких газов, как CH_4 и N_2O зависят также от условий и технологии сжигания. Поэтому общие эмиссии G-го ПГ вычисляют как суммарные эмиссии, которые возникли на разных этапах работы автомобилей: в режиме стабильной работы двигателя и в режиме запуска двигателя, а также учтен ряд дополнительных параметров – тип автомобилей, наличие технологий контроля за выбросами, средняя скорость на разных участках дорог, возрастное распределение автомобилей и тому подобное.

Сформирована математическая модель эмиссии ПГ за год в населенном пункте S (или в одной из построенных вокруг него зон для $S \in \widetilde{S}^{Z}$), что принадлежит административному району R:

$$E_{Tr}^{G}\left[Z^{n}(S)\right] = \frac{M^{R}(f,t)}{\sum_{w} a_{b}^{O}(t,w)} \cdot \frac{Q(S)\cdot C_{n}}{\sum_{s\in\widetilde{S}^{R}} Q(s)} \times$$

$$\times \sum_{b=1}^{B}\sum_{t=1}^{T}\sum_{f=1}^{F}\sum_{w} EF_{Hot}^{G}\left[f,t,V(H_S),w\right]\cdot a_{b}^{O}(t,w)\left\{1 + K_S(\beta)\left[\frac{EF^{G;Cold}}{EF^{G;Hot}}(t_a,w)\Big|_{j} - 1\right]\right\} \; n=\overline{0,3}; \quad (4)$$

$$O = \left\{O \in \widetilde{O} \wedge S \mathrel{\widehat{\in}} O\right\};\; R = \left\{R \in \widetilde{R} \wedge S \mathrel{\widehat{\in}} R\right\};\; \widetilde{S}^{R} = \widetilde{S} \mathrel{\widehat{\cap}} R,$$

где $E_{Tr}^{G}\left[Z^{n}(S)\right]$ – эмиссии G-го ПГ в населенном пункте S ($n = 0$) или в одной из условно построенных буферных зон вокруг S ($n = 1, 2, 3$); $K_S(\beta)$ – часть общего пробега, выполненного на неразогретом двигателе для населенного пункта S (зависит от типа населенного пункта и части общего пробега на неразогретом двигателе); $M^{R}(f,t,b)$ – пробег автомобилей типа t, что находятся в частной собственности, на топливе типа f в административном районе R; $Q(S)$ – количество населения, которое проживает в населенном пункте S; w – возрастная группа автомобиля; EF_{Hot}^{G} – коэффициент эмиссии G-го ПГ при работе автомобиля определенного возраста, типа и конструкции, при рабочей температуре двигателя; $\frac{EF^{G;Cold}}{EF^{G;Hot}}(t_a,w)$ – отношение величины выбросов G-го

ПГ при холодном и горячем двигателе на единицу пробега; H_S – тип населенного пункта S (город, село, поселок городского типа); $a_b^O(t,w)$ – количество автомобилей в области O, что попадают в возрастную группу w; t_a – средняя температура атмосферного воздуха; l_{tr} – средняя длина одной поездки; V – средняя скорость транспортного средства; C_n – коэффициент буферной зоны вокруг населенного пункта.

По аналогичному к модели (4) принципу сформирована модель инвентаризации эмиссий от деятельности частного транспорта на автомобильных дорогах. Она учитывает параметры участка дороги (расположение, категория, длина, ширина и другие характеристики), коэффициенты эмиссии ПГ при работе автомобиля определенного возраста, типа и конструкции, количество автомобилей в области, которые попадают в соответствующую возрастную группу, и тому подобное.

Модель пространственного анализа «снизу-вверх» предусматривает проведение инвентаризации эмиссий ПГ для отдельных участков дорог. Путем географического сопоставления расположения сети дорог и населенных пунктов определенного типа, дороги дополнительно разделяют на городские ($\widetilde{D}^{Urb} = \widetilde{D} \mathbin{\widehat{\cap}} \widetilde{S}^{Urb}$), сельские ($\widetilde{D}^{Rur} = \widetilde{D} - \left(\widetilde{D}^{Urb} \cup \widetilde{D}^{Hway}\right) = \left\{D_1^{Rur}, D_2^{Rur}, \ldots\right\}$) и дороги, предназначенные для скоростного движения (за картографических кодов $\widetilde{D}^{Hway} = \left\{D_1^{Hway}, D_2^{Hway}, \ldots\right\}$).

На уровне элементарного участка источниками эмиссий являются части дорог и части территорий населенных пунктов, которые географически расположены в пределах элементарного участка, – это множественное число плоскостных и линейных объектов $D^{\delta} = \left\{D \mathbin{\widehat{\cap}} \delta, D \in \widetilde{D}\right\}$ и $S^{\delta} = \left\{S \mathbin{\widehat{\cap}} \delta, S \in \widetilde{S}\right\}$. Эмиссии находят следующим образом:

$$E_{Tr}^{G}(\delta) = \frac{1}{2}\left[\sum_{s\in\widetilde{S}} \frac{E_{Tr}^{G}(s)\cdot area(s \mathbin{\widehat{\cap}} \delta)}{area(s)} + \sum_{d\in\widetilde{D}} \frac{E_{Tr}^{G}(d)\cdot len(d \mathbin{\widehat{\cap}} \delta)}{len(d)}\right],$$

где $area(x)$ – площадь географического объекта x; $area(x)$ – длина линейного объекта x; δ – элементарный участок территории.

Результаты моделирования пространственного распределения эмиссии ПГ

Для реализации пространственных моделей эмиссии парниковых газов и для визуального представления результатов целесообразно использовать инструментарий геоинформационных систем (ГИС). Геоинформационные системы предназначены для хранения, отображения и анализа данных, которые содержат географическую привязку к территории. Такие системы дают возможность совмещать модельное изображение территории (цифровое отображение карт, схем, космических снимков и аэроизображений земной поверхности) с информацией табличного типа (разнообразные статистические данные, списки, экономические показатели и тому подобное). При работе с геоинформационными системами вся информация хранится в гераспределённых базах данных, которым отвечают цифровые карты. Такие карты отображают территориальное размещение объектов, а информация относительно определенных свойств и характеристик этих объектов хранится в соответствующих полях гераспределённой базы данных, которая неявно содержит географическую привязку к объектам на карте.

Для реализации моделей пространственно распределенной инвентаризации эмиссий ПГ в жилищном секторе использованы цифровые карты населенных пунктов и автомобильных путей Украины [2], дополнительно для каждого поселения установлен

его тип (например, город, поселок) и количество населения, которое в нем проживает, по официальным данным. Из статистических сборников (например, [3]) использованы показатели потребления топлива населением на уровне областей, районов и городов областного подчинения, а также учтены объемы продаж населению топлива через автозаправочные станции; выделены населенные пункты, которые оставались не газифицируемыми в соответствующем году.

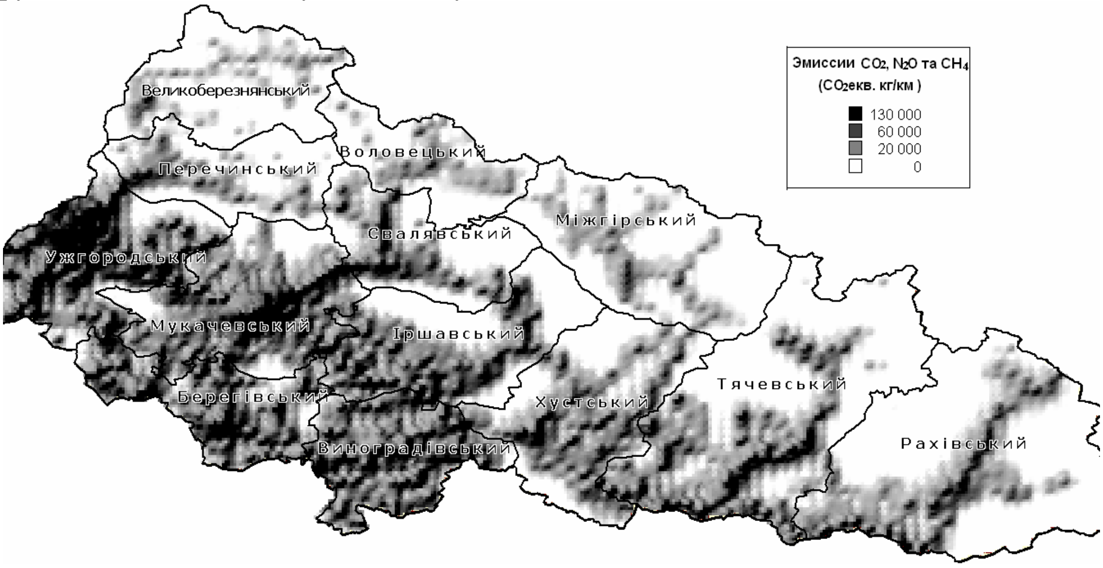


Рисунок 1 – Удельные эмиссии CO_2, CH_4 и N_2O от сжигания бензина и дизтоплива, реализованного населению через автозаправочные станции, на территории Закарпатской области на уровне участков 2 км × 2 км (кг/км^2; в CO_2-екв.; 2008 г.)

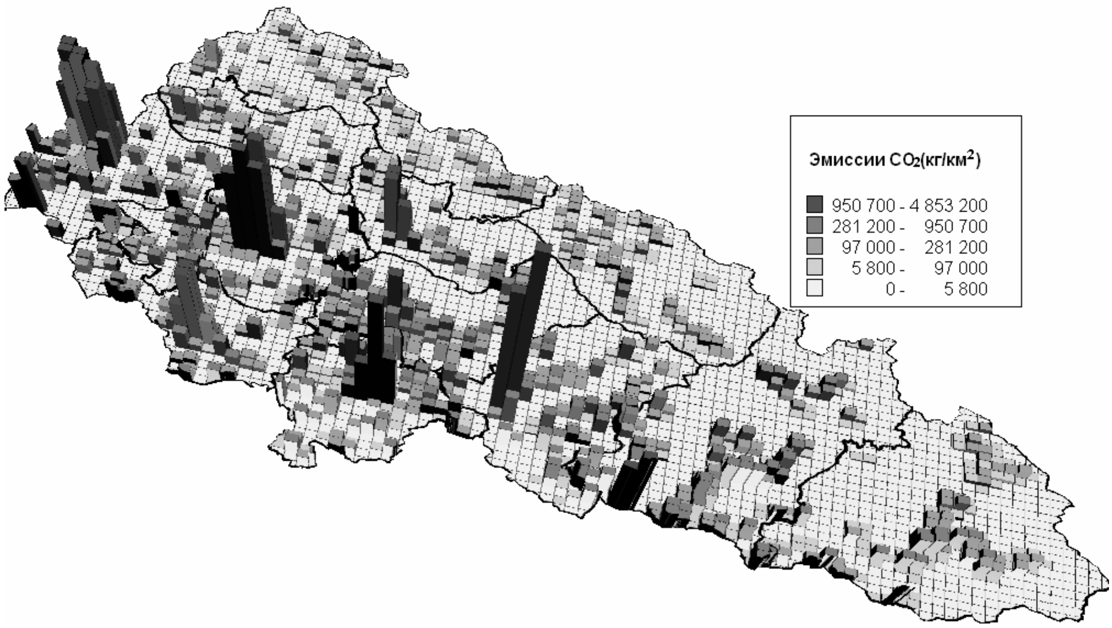


Рисунок 2 – Карта-призма удельных эмиссий CO_2 от сжигания природного газа, реализованного населению, на территории Закарпатской области (2 км × 2 км; кг/км^2; в 2008 г.)

На основании вышеприведенных моделей пространственного анализа эмиссии ПГ в жилищном секторе, используя коэффициенты эмиссии ПГ, предложенные МГЕЗК [4], с учетом физико-химических свойств национального топлива, реализованного населе-

нию региона [5], получены территориальные распределения эмиссий ПГ от сжигания топлива населению в Закарпатской области.

Как пример, на рис. 1 изображено пространственное распределение эмиссий CO_2, CH_4 и N_2O от сжигания бензина и дизтоплива, реализованного населению через автозаправочные станции, на территории Закарпатской области на уровне элементарных участков 2 км × 2 км (по данным 2008 г.). Для визуального отображения данных использован метод IDW-интерполяции, который заключается в использовании средневзвешенных значений с весами, обратно пропорциональными расстоянию. На рис. 2 изображен другой вариант визуального представления результатов моделирования – с помощью карты-призмы, где величина эмиссий отвечает высоте и цвету столбца на территории отдельного элементарного участка.

С помощью тематических карт удобно исследовать структуру эмиссий ПГ как по видам употребленного топлива, так и по направлениям его использования. Исследование структуры эмиссий можно проводить и для отдельных регионов, населенных пунктов или элементарных участков. Например, на рис. 3 изображено распределение эмиссий от стационарных и подвижных источников в жилищном секторе и их соотношения по величине (в шкале корня квадратного) на уровне административных районов.

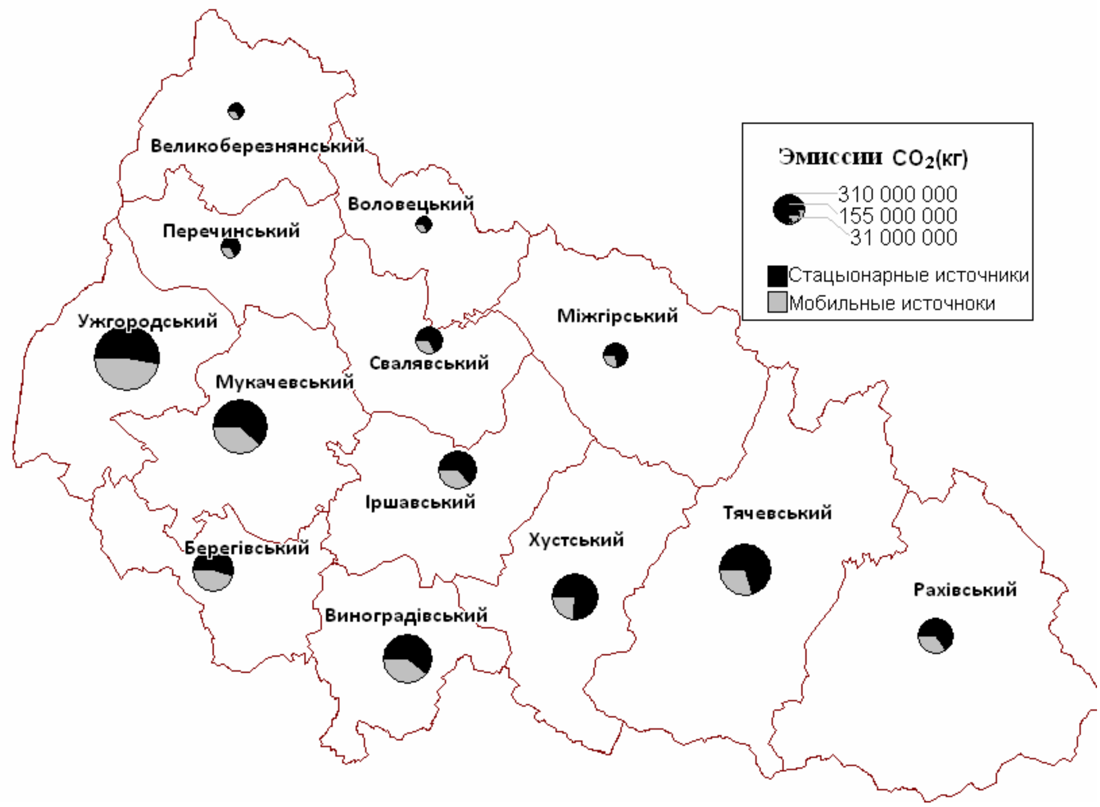


Рисунок 3 – Структура эмиссии CO_2 по видам источников эмиссий от сжигания топлива в жилищном секторе (2008 г.; шкала корня квадратного)

Выводы

Результаты пространственной инвентаризации выбросов ПГ прямого действия на территории Закарпатской области засвидетельствовали значительную неравномерность распределения источников эмиссий, что подтверждает важность пространственно распределенного моделирования эмиссий в жилищном секторе. Такой подход позволяет

учитывать разные типы источников эмиссий и для каждого источника учитывать специфические параметры, которые определяют уровень эмиссий (например, плотность населения, загруженность конкретного участка дороги, химические характеристики топлива, которое поставляется в конкретном регионе, и тому подобное).

В результате моделирования сформированы цифровые карты и георaспределенные базы данных, в которых каждому элементарному участку отвечает запись, которая содержит информацию о географическом расположении объекта, имеющихся источниках эмиссий, структуре и количественных оценках эмиссий в разрезе отдельных ПГ и сортов топлива. Такого уровня информация является чрезвычайно ценной для разработки природоохранных конкретных мер и для моделирования процессов распространения парниковых газов в атмосфере.

Литература

1. Geoinformation technology and greenhouse gas spatial inventory: An analysis of structural changes in energy sector / R. Bun, Kh. Hamal, M. Gusti, A. Bun // Zeszyty Naukowe : Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Przemyślu. − № 1 : Materiały I Międzynar. Sesji Naukowej «Środowisko i Technologie Informatyczne a Zdrowie Człowieka». – Przemyśl, Poland, 2008. – S. 14-34.
2. Просторова база даних України масштабу 1:500 000. Версія 1.5 / Товариство з обмеженою відповідальністю «Інтелектуальні Системи ГЕО» (ТОВ ІСГЕО).
3. Статистичний щорічник «Закарпаття – 2008» : статистичний збірник. – Ужгород : Головне управління статистики у Закарпатській обл., 2009. – 650 с.
4. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. : в 5 т. / [Х. С. Игглестон, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе (редакторы)]. – ИГЕС, Япония, 2006. – Т. 2 : Енергетика. – 2006. – 309 с.
5. Березницкая М.В. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ в Украине за 1990 − 2006 гг. / [М.В. Березницкая, О.В. Бутрим, Г.Г. Панченко, Ю.В. Пироженко, А.П. Хабатюк]. – Киев : Министерство охраны окружающей природной среды Украины, 2008. – 310 с.

Х.В. Гамаль, О.І. Пилипчак

Розробка підходу до моделювання просторово розподілених емісій парникових газів на прикладі їх інвентаризації у житловому секторі Закарпатської області України

У статті розглянуто проблему побудови підходу до моделювання просторово розподілених емісій парникових газів від пересувних та стаціонарних джерел емісії у житловому секторі. Запропоновано метод просторової інвентаризації парникових газів, який базується на використанні лінійних та площинних джерел емісій і геоінформаційних систем, що надає можливість враховувати специфіку емісійних процесів на рівні елементарних об'єктів заданого розміру.

Kh.V. Hamal, O.I. Pylypchak

Development of Approach to Modeling of Spatially Referenced Greenhouse Gas Emissions Inventory in Residential Sector of Zakarpattja Region

The paper is dedicated to creation of methods of spatial greenhouse gas emissions analysis from mobile and stationary sources of emissions in residential sector. The method of spatial greenhouse gas emissions inventory on the regional level is proposed that bases on using line and area emissions sources and geoinformation technologies and gives the possibility to take into account the specificity of emission processes on the level of elementary cells of a given size.

Статья поступила в редакцию 09.06.2010.